

# 断熱二重巻覆工によるトンネルのつらら防止工法の断熱材の最適化に関する研究

## OPTIMIZATION OF A HEAT INSULATOR IN AN ADIABATIC DOUBLE LINING FOR ICICLE PREVENTION

岡田勝也\*・松本嘉司\*\*

By Katsuya OKADA and Yoshiji MATSUMOTO

This paper deals with the optimization of a heat insulator in a double lining for icicle prevention, in which a heat insulating material is sandwiched between the outer and inner linings. A tunnel model using a non-steady state heat convection/conduction is proposed for a tunnel-ground with adiabatic treatment. The calculated values well agreed with the observed values of actual tunnels. Then using the tunnel model a procedure to select the material and the thickness of a heat insulator is proposed. Thus a heat insulator to be provided in a newly constructed tunnel with an adiabatic double lining can be designed reasonably and economically on the basis of the periodicity of an atmospheric condition and the thermal conditions of a tunnel-ground.

*Keywords*: icicle prevention, adiabatic double lining, heat insulator, heat convection/conduction

### 1. ま え が き

寒冷地におけるトンネル漏水は、冬期につららや側氷に発達し、さらに極寒冷地になるとトンネル覆工背面の凍結を生じさせる。こうした結氷する鉄道トンネルは、全トンネル数約3800本のうちの約28%にも達する。

つららは、一晩で車両限界を侵すほどに成長するものも多く、列車運行に重大な影響を及ぼす。また側氷はそれに加えて、線路巡回や作業員の歩行を困難にし、トンネル内の保守作業に危険を与える。このようなつららと側氷を除去するため、一番列車の前の未明に人力によるつらら落し作業や削氷作業を行って、列車運行を確保してきたのが従来の実状であった。

また覆工背面の凍結は地山の凍上作用を引き起こし、トンネルを変状させ、劣化を促進させるものも多い。

そのような背景の中、人力によるつらら落し作業という過酷な労働環境の改善と保守作業の近代化を踏まえ、積極的なつらら防止工法が望まれてきた。その一環として、まず既設トンネルのつらら防止工法としての表面断

熱処理工法が開発された。これは既設トンネルの覆工表面を断熱材によって直接あるいは間接に被覆するもので、この設計に必須な断熱材の厚さ、延長幅、土被りと積雪効果について実験的理論的な解析が行われ、年平均気温、気温の年振幅と日振幅、土被り、積雪の有無をパラメーターに設計条件が提案され、これに基づいて多くの鉄道トンネルの改良が実施されてきた<sup>1)~3)</sup>。

この既設トンネル用の表面断熱処理工法を新設トンネルに応用したのが、断熱二重巻覆工であり、NATMの工程に組み入れられ、吹付コンクリート（一次覆工）の

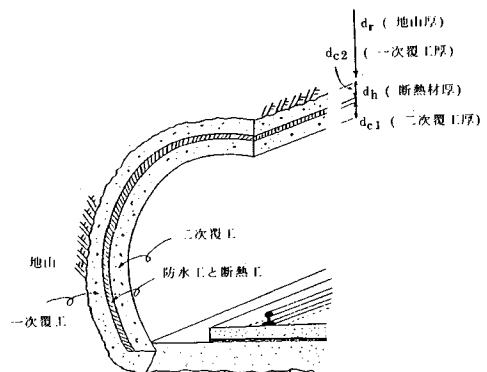


図-1 断熱二重巻覆工トンネルの概念図

\* 正会員 工博 (財) 鉄道総合技術研究所 主任研究員  
(〒185 国分寺市光町 2-8-36)

\*\* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科  
(〒113 文京区本郷 7-3-1)

上に防水シートと断熱材を添付した後、二次覆工を施工するものであり、その概念図は図-1 のようである。当報文は、断熱二重巻覆工において設計の基本となる断熱材の材質とその厚さの最適化について述べるものである。

2. 断熱二重巻覆工のトンネル地山モデル

新設トンネルにおける断熱二重巻覆工(図-1)の温度挙動を解析するためのトンネル地山モデルとして、図-2に示すような一次元モデルを考えた。トンネルの土被りが比較的厚く、しかもトンネル断面が鉄道トンネル程度の大きさであれば、一次元モデルでも十分温度挙動を表現できるからである<sup>3)</sup>。図-2は、トンネル内気温、二次覆工、断熱材、一次覆工と地山からなる四層系モデルであり、系はトンネル横断方向に  $N$  個の要素からなる。座標  $0$  はトンネル内気温で覆工表面から十分離れた温度境界層の外側にある。異物質の境界座標は  $A, B, C$  であり、要素の分割長さ境界座標は  $D, E$  と  $G$  である。図-2に示すように要素の分割長さは  $\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2$  と  $\Delta x_3$  であり、断熱材厚、一次覆工厚、二次覆工厚と考慮すべき地山の厚さはそれぞれ、 $d_h, d_{c1}, d_{c2}$  と  $d_r$  で表わされる。

いま、異物質境界座標と分割長さ境界座標が一致する場合を仮定し、時刻  $P$  における要素  $m$  の温度を  $T_m^p$ 、それよりも  $\Delta t$  時間だけ経過したときの要素  $m$  の温度を  $T_m^{p+\Delta t}$  とし、さらに要素  $m$  より  $\Delta x_A$  だけ離れた要素  $(m-1)$  の  $A$  物質と、 $\Delta x_B$  だけ離れた要素  $(m+1)$  の  $B$  物質を考慮すると、一次元非定常熱伝導 explicit 型差分式はすでに報告されている<sup>3)</sup> ように、

$$T_m^{p+\Delta t} = T_m^p + \frac{2\beta\theta_A}{\delta(1+k\delta)}(T_{m+1}^p - T_m^p) + \frac{2\theta_A}{1+k\delta}(T_{m-1}^p - T_m^p) \dots (1)$$

である。ここに、

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \lambda / c\rho \\ \delta &= \Delta x_B / \Delta x_A \\ \beta &= \lambda_B / \lambda_A \\ k &= (c\rho)_B / (c\rho)_A \\ \theta_A &= \alpha_A \Delta t / (\Delta x_A)^2 \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

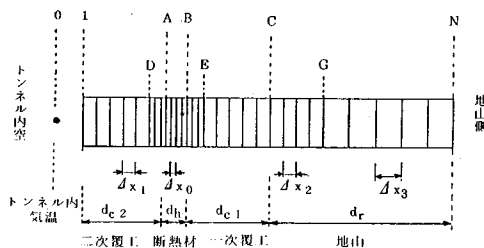


図-2 断熱二重巻覆工を有するトンネル地山モデル

である。なお、 $\lambda$  は熱伝導率、 $(c\rho)$  は熱容量、 $\alpha$  は温度伝導度である。

また、トンネル内空に接する要素では熱伝達条件を考慮せねばならない。図-2で要素  $0$  はトンネル内流体の温度  $T_0$  であり、要素  $1$  では二次覆工表面温度  $T_1$  であるから、熱伝達率  $\alpha$  を導入することにより、

$$T_1^{p+\Delta t} = T_1^p + 2\theta(T_0^p - T_1^p) + 2\theta\alpha h(T_0^p - T_1^p) \dots (3)$$

ただし、 $h = \Delta x / \lambda$  である。

断熱二重巻覆工のトンネル地山モデルに対する気温の入力条件として、式(3)のトンネル内気温  $T_0^p$  を与える必要がある。トンネル内気温の年周期変動に対しては、年平均気温を  $t_m$ 、その年振幅を  $A_Y$  としたとき、 $\theta_0 = T_0^p$  として、次式で与えられる。

$$\theta_0 = t_m + A_Y \sin(2\pi/365)t \dots (4)$$

なお、 $t$  の単位は日である。日周期変動に対しては、 $t$  の単位を時間とすれば次のようになる。

$$\theta_0 = A_D \sin(2\pi/24)t \dots (5)$$

また、地山の座標  $N$  における地山温度は考慮すべき地山の厚さ  $d_r$  を十分大きくとれば、一般にはその地山の年平均気温  $t_m$  に収束するので、次式で表わされる。

$$T_N^p = t_m \dots (6)$$

したがって、断熱二重巻トンネルの温度挙動に関する一次元非定常熱伝導解析は、入力条件としての式(4)などを考慮しながら、熱伝達の式(3)、異物質と要素の分割長さを考慮した式(1)を組み合わせ、さらに地山の境界条件の式(6)を入力することによって実行できる。

なお、図-2の覆工コンクリートの熱伝導率  $\lambda_c$  に対する断熱材の熱伝導率  $\lambda_h$ 、地山の熱伝導率  $\lambda_r$  の比、

$$\left. \begin{aligned} \beta_h &= \lambda_h / \lambda_c \\ \beta_r &= \lambda_r / \lambda_c \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

をそれぞれ、断熱材の無次元熱伝導率、地山の無次元熱伝導率とよぶことにする。

3. トンネル内気温の周期変動に対するトンネル地山の温度挙動の概念

断熱二重巻覆工を有するトンネル地山モデルにおいて、トンネル内気温  $\theta_0$  が式(4)と式(5)に従って周期変動するときの温度振幅の概念図は図-3のようになる。図-3の実線はトンネル内気温の年振幅  $A_Y$  による年振幅挙動の包絡線を、破線はその日振幅  $A_D$  による日振幅挙動の包絡線を示すものであるが、トンネル内気温  $\theta_0$  の最小値は、次のように表わされる。すなわち、

$$\theta_{0,\min} = t_m - A_Y - A_D \dots (8)$$

つらら防止工として着目すべき断熱材背面温度  $\theta_B$  の最小値は、

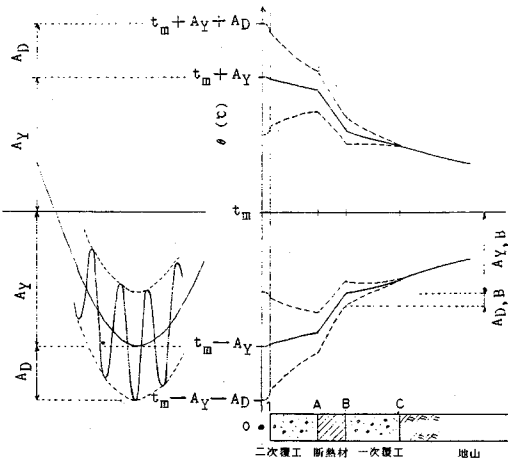


図-3 断熱二重巻覆工の温度減衰モデル

$\theta_{B,min} = t_m - A_{Y,B} - A_{D,B}$  ..... (9)

である。ここに  $A_{Y,B}$  はトンネル内気温の年周期変動に対する断熱材背面の温度振幅であり、 $A_{D,B}$  は日周期変動に対する断熱材背面の温度振幅である。つらら防止工としては  $\theta_{B,min} > 0$  となることが必要条件であるから、式 (9) は

$$t_m > A_{Y,B} + A_{D,B} \dots\dots\dots (10)$$

でなければならない。ここで無次元振幅  $k_{Y,B}$  と  $k_{D,B}$  を

$$\left. \begin{aligned} k_{Y,B} &= A_{Y,B}/A_Y \\ k_{D,B} &= A_{D,B}/A_D \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

で与え、トンネル内気温の日振幅・年振幅比  $\eta$

$$\eta = A_D/A_Y \dots\dots\dots (12)$$

のパラメーターを導入すれば、式 (10) は

$$t_m/A_Y > k_{Y,B} + \eta k_{D,B} \dots\dots\dots (13)$$

となる。式 (13) において、 $t_m$ 、 $A_Y$  と  $\eta$  はトンネルの存在する地方の気象条件により与えられるものであり、 $k_Y$  と  $k_D$  は非定常熱伝導モデルによる解析結果として得られるから、式 (13) を満足するように断熱材の種類と厚さを選択することが可能となる。

なお、一次覆工背面の地山の凍上性を問題とする場合には、一次覆工背面温度の最小値が  $\theta_{c,min} > 0$  である必要があり、このときには式 (11) の添字 B を C として

$$t_m/A_Y > k_{Y,C} + \eta k_{D,C} \dots\dots\dots (14)$$

が得られるが、この式が断熱材設計の基本式となる。

#### 4. 断熱二重巻覆工の温度挙動に関する計算値と実測値の比較

##### (1) 蘭法華トンネルの例

蘭法華トンネルは室蘭本線の電化に伴い現在線の山側で新設された延長 322 m の複線交流電化型トンネルで、NATM により断熱二重巻覆工が施工された。断熱二重

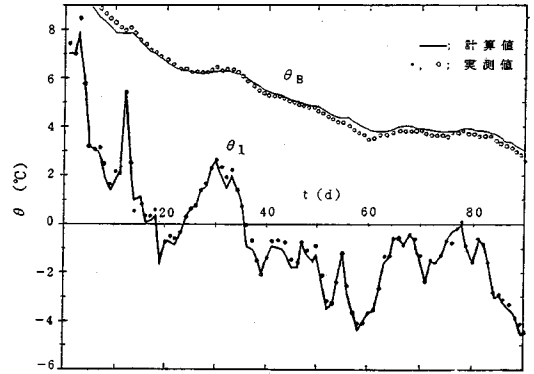


図-4 二次覆工表面温度  $\theta_1$  と断熱材背面温度  $\theta_B$  の経日変化 (蘭法華トンネル)

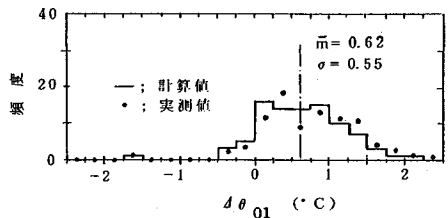


図-5 温度差  $\Delta\theta_1$  の計算値と実測値の比較

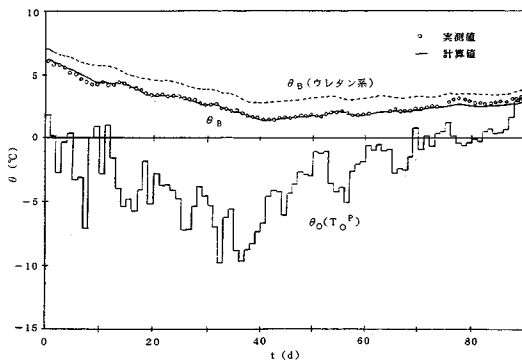
巻覆工の一次覆工厚は  $d_{c1} = 25$  cm、二次覆工厚は  $d_{c2} = 35$  cm であり、サンドイッチされた断熱材はポリウレタンであり、その断熱材厚さは後述の 6. に従い  $d_h = 3$  cm と決定した。

厳寒期 90 日間 (1981 年 12 月 1 日～1982 年 2 月 28 日) の断熱材背面温度  $\theta_B$  と二次覆工表面温度  $\theta_1$  の実測値と計算値の比較は図-4 のとおりである。また  $\theta_1$  とトンネル内気温  $\theta_0$  との温度差  $\Delta\theta_1$  の頻度分布に対する比較は図-5 のようである。なお式 (3) における熱伝達率としては当トンネルの実測結果<sup>3)</sup>に基づく  $\alpha = 5.8$  W/m<sup>2</sup>C を入力して、計算を進めた。図-4 と図-5 の計算値は実測値を十分満足するものであるといえる。

##### (2) 直別トンネル

直別トンネルは根室本線にあって、旧直別トンネルの凍害による老朽劣化のために新設された延長 300 m の単線トンネルであり、出入口のおおの 30 m のサイロットを除く中間の延長 240 m は NATM で施工されたが、全長が断熱二重巻覆工である。NATM 区間の覆工厚は、 $d_{c1} = 20$  cm、 $d_{c2} = 35$  cm であり、ポリウレタン系とポリエチレン系の 2 種類の断熱材が使用された。これらの断熱材の厚さは後述の 6. を参考として、前者で  $d_h = 3.5$  cm、後者で  $d_h = 4.0$  cm に決定された。

図-6 はトンネル内気温  $\theta_0$  に対するポリエチレン系断熱材の背面温度  $\theta_B$  の 90 日間 (1982 年 1 月 1 日～3 月 31 日) の温度応答を示したものであるが、 $\theta_B$  の計算値



図—6 断熱材背面温度  $\theta_b$  の経日変化 (直別トンネル)

は実測値をよく満足している。またポリウレタン系断熱材の背面温度  $\theta_b$  も破線で併記されているが、ポリエチレン系よりも高い温度を示しており、断熱効果のよいことを示している。これはポリウレタン系の断熱材の熱伝導率が  $\lambda_h=0.017 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  に対し、ポリエチレン系が  $\lambda_h=0.028 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  であるからである。いずれにせよ直別トンネルの断熱二重巻覆工の温度挙動を計算値は十分シミュレートすることができるといえる。

## 5. 断熱二重巻覆工における断熱材厚さの解析

### (1) 入力定数

#### a) 断熱二重巻覆工の厚さ

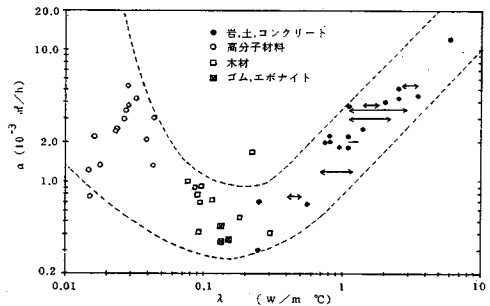
NATM によって施工された鉄道トンネルの一次覆工厚はおおむね  $5 < d_{c1} < 25 \text{ cm}$  である。二次覆工厚は  $30 \text{ cm}$  を越えるものもあるが、多くは  $20 < d_{c2} < 30 \text{ cm}$  の範囲にある。この程度の厚さの変動の範囲では、断熱材背面温度  $\theta_b$  などの年振幅挙動は  $d_{c1}$  にほぼ比例して増加し、 $d_{c2}$  にほぼ比例して低下するが、その厚さの影響は非常に小さい。また日振幅の挙動については年振幅の  $1/10$  以下であり、しかも  $d_{c2}$  の増加に伴って急速に小さくなる。

これらを考慮して、断熱二重巻覆工の標準的な一次覆工厚として  $d_{c1}=10 \text{ cm}$ 、二次覆工厚として  $d_{c2}=25 \text{ cm}$  を考えることにした。

#### b) 覆工と地山の熱特性

覆工コンクリートの熱的定数としては、ほぼ一定であり、平均的な熱伝導率として  $\lambda_c=1 \times 1.16 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 、熱容量として  $(c\rho)_c=1930 \text{ kJ/m}^3^\circ\text{C}$  を仮定した。

覆工背面以深の地山の熱的定数については図—7 に示すようにかなりの幅がある。図は熱伝導率  $\lambda$  と温度伝導度  $a$  の関係を示すものであるが、地山は  $\lambda_r=0.9 \sim 3.5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  であることを考慮し、標準的な地山の熱伝導率を  $\lambda_r=1$  と  $2 \times 1.16 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  の 2 種類とした。式 (7) の無次元熱伝導率で表すれば、それぞれ  $\beta_r=1$



図—7 熱伝導率  $\lambda$  と温度伝導度  $a$  の関係

と 2 に相当する。また地山の熱容量  $(c\rho)_r$  の変動が温度挙動に及ぼす影響は  $\lambda_r$  よりも小さいこと、ならびに岩石の比熱が  $c_r=0.75 \sim 0.92 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$  でほぼ一定であることを考慮して、 $(c\rho)_r=2100 \text{ kJ/m}^3^\circ\text{C}$  と仮定した。

#### c) 断熱材の熱特性

断熱材として高分子系の発泡断熱材を用いることにすれば、その熱特性は図—7 のようである。これによれば、断熱材の熱伝導率は  $\lambda_h=(0.015 \sim 0.04) \times 1.16 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  に分布する。マクロ的には、岩石や土の温度伝導度  $a$  がその熱伝導率  $\lambda$  の増加とともに大きくなるのに対し、断熱材では  $\lambda_h$  の低下とともに  $a_h$  が大きくなる傾向を示す。また断熱材の密度  $\rho$  が大きくなると  $\lambda_h$  は増加するので、熱容量  $(c\rho)_h$  は一定の値とはならない。そこで、断熱材を 3 種類に分け、①  $\lambda_h=0.015 \times 1.16 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 、 $(c\rho)_h=60 \text{ kJ/m}^3^\circ\text{C}$ 、②  $\lambda_h=0.025 \times 1.16 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 、 $(c\rho)_h=80 \text{ kJ/m}^3^\circ\text{C}$ 、③  $\lambda_h=0.040 \times 1.16 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 、 $(c\rho)_h=90 \text{ kJ/m}^3^\circ\text{C}$  を標準とした。これらの断熱材を式 (7) の無次元熱伝導率で表わせば、①～③に対してそれぞれ、 $\beta_h=0.015$ 、 $0.025$  と  $0.040$  となる。なお、熱容量  $(c\rho)_h$  の変動が断熱二重巻覆工の温度挙動に及ぼす影響は、熱伝導率  $\lambda_h$  のそれよりもはるかに小さいので断熱材の熱特性の分類は熱伝導率  $\lambda_h$  によって一義的に決定できると考えてもよい。

#### d) 二次覆工表面の熱伝達率

断熱二重巻覆工ではトンネル内流体 (空気) と二次覆工表面の間で熱伝達が行われる。図—2 のトンネル地山モデルでは座標 0 と 1 との間で式 (3) に従い熱伝達が行われる。

鉄道トンネルの覆工表面における熱伝達率は福地<sup>1)</sup>、雑賀<sup>5)</sup>、岡田<sup>3)</sup>らによって、鉾山の坑道にはたとえば幾世橋<sup>6)</sup>、天野<sup>7)</sup>らによって実測値が与えられているが、これらは既往の多くの提案式をほぼ満足するものであり、鉄道トンネルでは  $\alpha=5 \sim 10 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$  を考えておけばよい<sup>3)</sup>。

いま、断熱材厚  $d_h$  をパラメーターに、熱伝達率  $\alpha$  と式 (11) などに示す無次元振幅  $k_r$  の関係を描くと図—

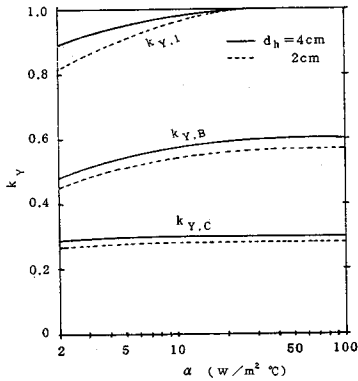


図-8 熱伝達率  $\alpha$  と年周期変動の無次元振幅  $k_y$  の関係

8 になるが、 $\alpha$  の増加とともに  $k_y$  は収束する傾向を示す。二次覆工表面の  $k_{y,A}$  はかなりの変動を示すが、断熱材背面の  $k_{y,B}$  と一次覆工背面の  $k_{y,C}$  に着目するかぎりでは、 $\alpha=5\sim 10\text{ W/m}^2\text{C}$  の範囲で、 $\alpha$  の  $k_{y,B}$  と  $k_{y,C}$  に対する応答感度は小さい。したがって設計上の安全側も考慮して  $\alpha$  を無視し、トンネル内気温と二次覆工表面温度が等しいものとして解析を進める。

e) トンネル温度モード

前述の入力定数 a)~d) は覆工、地山と断熱材の三者の熱特性と構造特性を述べたものであるが、これに気象条件としてのトンネル内気温の入力値となる式 (4) の年周期変動と、式 (5) の日周期変動を考慮すれば、2. で述べたトンネル地山の一次元非定常熱伝導モデルにより、断熱二重巻覆工の温度挙動が計算できる。断熱材算定のためのパラメーターとしては、断熱材厚  $d_h$ 、断熱材と覆工の熱伝導率比  $\beta_h$ 、地山と覆工の熱伝導率比  $\beta_r$ 、年周期・日振幅の周期  $i$  の 4 種類にまとめられる。なお  $\beta_h$  と  $\beta_r$  は式 (7) に示したとおりである。これらのパラメーターで示される条件をトンネル温度モードと称することにし、 $M(d_h, \beta_h, \beta_r, i)$  で表す。周期  $i$  は年周期と日周期に対し、 $i=365$  と 1 で示す。

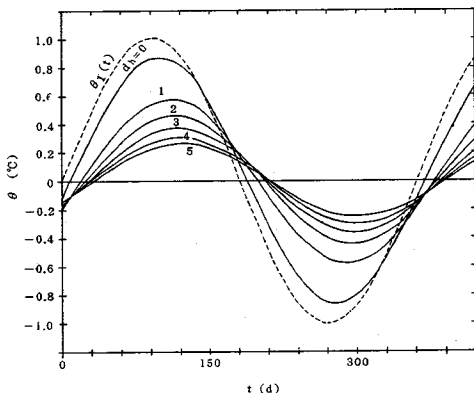


図-9 断熱材背面温度  $\theta_b$  の経日変化 (計算値)

(2) 年周期に対する断熱二重巻覆工の温度挙動

断熱材の無次元熱伝導率  $\beta_h=0.015$  のときのトンネル温度モード  $M(d_h, 0.015, 2, 365)$  に対する経日変化を断熱材厚  $d_h$  をパラメーターに描くと図-9 のようになる。図は年平均気温  $t_m=0^\circ\text{C}$ 、年振幅  $A_T=1.0^\circ\text{C}$  に対するものである。 $d_h=0\text{ cm}$  は断熱工のない一般的な二重巻覆工に相当するが、 $d_h$  が厚くなるに従って断熱材背面温度の振幅  $A_{Y,B}$  は小さくなるとともに、温度の位相が遅れていくことがわかる。

いま、図-9 の断熱材厚  $d_h=3\text{ cm}$  に着目して、トンネル横断面の温度分布を描くと図-10 のようになる。二次覆工表面 (座標 1) の温度振幅  $A_{Y,1}=1.0^\circ\text{C}$  は断熱材の中 (座標 A と B) で  $A_{Y,B}=0.36^\circ\text{C}$  まで縮減して、断熱効果を発揮することになるが、温度の位相遅れのために  $A_{Y,B}$  が最大となる時とトンネル内気温の  $A_{Y,1}$  のその時とは一致しないことは図-9 からわかる。しかしトンネル横断面における温度の最大値と最小値の包絡線 (図-10 の破線) は地山の奥深くで収束する。

断熱材背面の温度振幅  $A_{Y,B}$  を式 (11) によって無次元振幅  $k_{y,B}$  に変換し、断熱材の無次元熱伝導率  $\beta_h$  をパラメーターとして断熱材厚  $d_h$  に対して描くと図-12 と

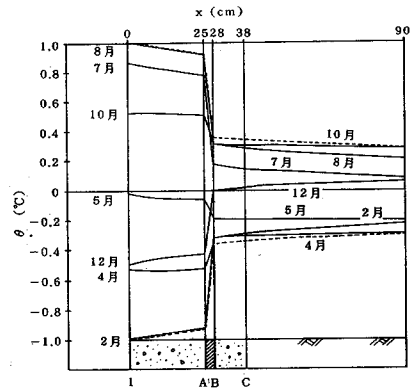


図-10 トンネル横断面の温度分布 (年周期)

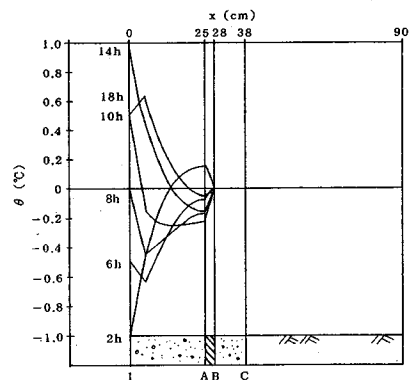
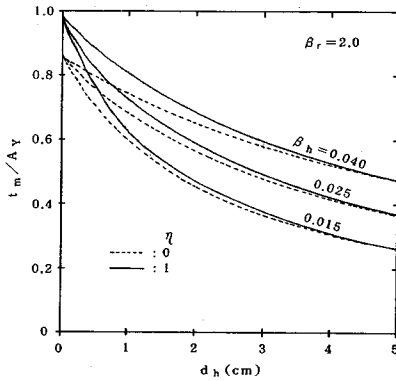
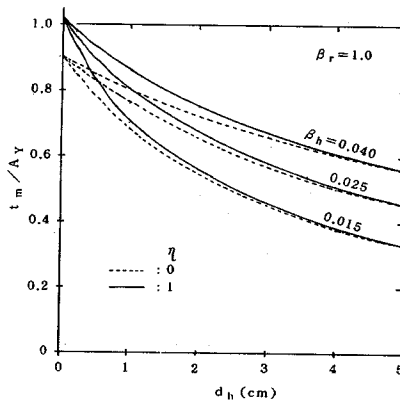


図-11 トンネル横断面の温度分布 (日周期)



図—12 断熱材厚  $d_h$  と振幅比  $t_m/A_y$  の関係 ( $\beta_r=2.0$ )



図—13 断熱材厚  $d_h$  と振幅比  $t_m/A_y$  の関係 ( $\beta_r=1.0$ )

13の  $\eta=0$  の曲線のようになる。これらの図の縦軸は  $t_m/A_y$  であるが、 $\eta=0$  のときには式 (13) から  $t_m/A_y = k_{y,B}$  と考えてよい。さて、図は断熱材厚  $d_h$  が薄くなると無次元振幅  $k_{y,B}$  は急激に大きくなり、断熱材の無次元熱伝導率  $\beta_h$  が小さくなるほど  $k_{y,B}$  は小さくなる。しかも両図を比較すれば、地山の無次元熱伝導率  $\beta_r$  の大きい方が  $k_{y,B}$  が小さくなることもわかる。

### (3) 日周期に対する断熱二重巻覆工の温度挙動

日周期に対する応答も前述の (2) と同様に解析できる。いま、トンネル温度モード  $M(3, 0.015, 2, 1)$  に対するトンネル横断面の温度分布を描くと図—11 のようになる。温度挙動の非定常性のために温度分布は直線にはならない。これを年周期に対する図—10 と比較するとトンネル内気温の地山への進入が日振幅の場合は非常に小さくなり、一次覆工以深ではほとんど無視できる程度に減衰してしまうのがわかる。このように日振幅に対する断熱材背面の温度振幅  $A_{D,B}$  は年振幅に比較して非常に小さくなるばかりでなく、断熱材厚  $d_h$  が増加すると急激に減衰する。

## 6. 断熱二重巻覆工における断熱材厚さの提案

断熱二重巻覆工における断熱材の材質とその厚さの最適化は、上述の年周期挙動の 5.(2) と日周期挙動の 5.(3) を組み合わせることによって実行できる。すなわち 5.(1) で述べた入力定数に対するトンネル温度モード  $M(d_h, \beta_h, \beta_r, i)$  の解析結果を、式 (11) に基づき断熱材背面の無次元振幅  $k_{y,B}$  と  $k_{D,B}$  に整理し、さらに式 (12) の日振幅・年振幅比  $\eta$  を考慮すれば、式 (13) の  $t_m/A_y$  は、地山の無次元熱伝導率  $\beta_r=2$  と 1 に対してそれぞれ図—12 と 13 のように与えられる。

これらの両図は、 $\beta_h$  が小さく、 $d_h$  が厚く、 $\eta$  が小さいほど、また  $\beta_r$  が大きいほど、断熱効果はよくなり、 $t_m/A_y$  が小さくなることを示している。しかも  $\eta$  の影響は  $d_h$  が厚くなると小さくなる。このことは断熱材の厚い場合にはトンネル内気温の日振幅挙動が断熱材背面には及びにくくなることを示すものである。

いずれにせよ、図—12 と 13 はトンネル内気温の気象条件である年平均気温  $t_m$ 、その年振幅  $A_y$  と振幅比  $\eta$  が与えられれば、地山の無次元熱伝導率  $\beta_r$  に従い、最適の断熱材 (無次元熱伝導率  $\beta_h$ ) の種類とその厚さ  $d_h$  が合理的に決定できることになった。

## 7. あとがき

断熱二重巻覆工は、トンネル建設時からのメンテナンスフリーを目指したものであり、当解析によって検討した蘭法華、直別の 2 トンネルでは開業後数年近くになるが何ら変状を生じておらず、新しい凍害防止工法としての地位を確保しつつある。この報文がトンネルの合理的経済的な設計施工法の簡略化と標準化に少しでも役立つことになれば幸いである。

### 参考文献

- 1) 岡田勝也・福地合一：断熱処理によるトンネルのつらら防止工の研究，土木学会論文報告集，第 309 号，1981.
- 2) 岡田勝也：断熱処理によるつらら防止工の土壁りの小さいトンネルへの適用性，土木学会論文報告集，第 332 号，1983.
- 3) 岡田勝也：鉄道トンネルにおける断熱処理によるつらら防止工法に関する研究，鉄研報告，No.1324，1986.
- 4) 福地合一：長大鉄道トンネルの換気に関する理論とその応用例について，鉄研報告，No.1076，1978.
- 5) 雑賀忠昭・森田敏男・斎藤孝基，ほか：地下鉄道の温熱環境の解析，空気調和・衛生工学，Vol.47，No.6，1973.
- 6) 幾世橋広，ほか：坑道壁面から通気への熱伝達率の実測と予測 (I)，日本鉱業会誌，Vol.93，No.1078，1977.
- 7) 天野勲三，ほか：年間気流湿度および温度の予測計算，日本鉱業会誌，Vol.96，No.1103，1980.

(1987.2.13・受付)